METHODS FOR REDUCTION IN ACK/NACK SIGNALING AND CHANNEL ESTIMATION OVERHEAD IN MASSIVE MIMO SYSTEMS

BRIJESH CHANDER PANDEY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JUNE 2021

©Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2021

Methods for Reduction in ACK/NACK Signaling and Channel Estimation Overhead in Massive MIMO Systems

by

BRIJESH CHANDER PANDEY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2021

Dedicated to

My Family

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Methods for Reduction in ACK/NACK Signaling and Channel Estimation Overhead in Massive MIMO Systems"** being submitted by **Mr. Brijesh Chander Pandey** to the department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is the record of bonafide research work carried out by him under my supervision. In my opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Dr. Saif Khan Mohammed
Associate Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi, 110016, India

Date:
Place: New Delhi

Acknowledgements

First and foremost, I want to express my heartfelt and sincere gratitude to my PhD supervisor, Dr. Saif Khan Mohammed, for his continuous support, patience and invaluable advice during my several years here at IITD. His vast experience and immense knowledge helped me a lot during my research work. His teachings improved my subject knowledge and thinking ability which are very beneficial to think beyond my research topic. This PhD work would not have been achievable without his supervision and constant feedback.

Beside my supervisor, I would like to thanks all members of my student research committee including Prof. Shankar Prakriya, Prof. Monika Aggarwal, and Prof. Brejesh Lall for their encouragement and valuable suggestions all the years. I consider myself blessed to attend a great institution like IITD, where I have learnt a lot from outstanding courses in the Department of Electrical Engineering. I am thankful to " Visvesvaraya Ph.D. Scheme of Ministry of Electronics and Information Technology, Government of India," for the financial support during my PhD work.

I am grateful to my friends and my fellow researchers for their unconditional support and motivation. In addition, I am extremely grateful to God and my family for their constant support and inspiration.

Brijesh Chander Pandey

Abstract

The central idea of fifth generation (5G) wireless communication systems is to create a wireless world which is free from all barriers and limitations of the past generations. Not only industries but also governments of nearly all nations are showing huge interest for 5G, which is not just a simple enhancement of mobile broadband in 4G. 5G communication systems are expected to meet quality of service (QoS) requirement of new communication scenarios like ultra reliable low-latency communication (URLLC) systems for new applications like automatic driving, remote surgery, etc. 5G communication systems incorporates many promising technologies such as visible light communication (VLC), massive multiple-input multiple-output (MIMO), millimeter-wave communication, and heterogeneous network (HetNet) so forth. Massive MIMO is one of the most promising technologies to fulfill the need of the ever increasing traffic demand.

High spectral efficiency and low latency are key features in 5G communication systems. Both of these aspects of 5G are immensely affected by the overheads in communication systems. These overheads help to meet higher quality of services (QoS) requirements of end users by improving performance of the system, at the expense of available time and frequency resources. It includes authentication of mobile unit by the network, training data for channel measurement, allocation of traffic channels, acknowledgment of correct reception of data, cyclic prefix etc. Some common transmission overheads in 4G/5G wireless communication systems are control signals, channel estimation and cyclic prefix. In this thesis, we have proposed new transmission methods for massive MIMO systems, in which acknowledgement (ACK) or negative acknowledgement (NACK) control signaling and channel estimation overhead are significantly less compared to current communication systems.

Firstly, we consider the ACK/NACK control signaling overhead. In 4G LTE, Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) based transmission methods are used which retransmit information until it gets correctly decoded. In stop-and-wait type HARQ, a lot of delay and overheads are introduced as for every retransmission the transmitter needs to wait for the receiver to decode the codeword and signal the acknowledgement (ACK/NACK) . The signaling of ACK/NACK increases the overall system overhead. *To reduce overhead, we have proposed an uplink transmission method for massive MIMO systems called as the "Low Control Signaling and CSI Feedback" (LSF) method.* The proposed method is based on the fact that channel capacity varies slowly over time, due to channel hardening in massive MIMO systems. We utilize this fact, for deciding the proper length of the codeword only once based on an initial estimate of the uplink channel capacity fed back by the base station (BS). The user terminal (UT) encodes the information into a codeword of the appropriate length and then transmits it over consecutive coherence intervals (CIs) without waiting for any acknowledgement (ACK/NACK) from the BS. Decoding is performed by the BS only once after the entire codeword has been received. After decoding, BS sends only a single ACK/NACK to the UT. Hence, the proposed LSF method has less latency and signaling overhead when compared with HARQ methods used in LTE uplink.

Next, we consider the overhead due to channel estimation, specially for time varying and frequency selective channel. Accurate channel estimates are required for coherent detection, beamforming, resource allocation etc. In pilot based channel estimation, known pilot symbols, are transmitted, and the receiver uses the received pilots to estimate the channel. High mobility (upto 500 km/hr) is one of a key feature of 5G communication systems. In high mobility scenarios, due to high Doppler spread, the channel coherence interval (CI) is small. Small CI leads to low data rate and high channel estimation overhead. The performance of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based multi-user massive MIMO systems degrades severely with increasing mobility induced Doppler spread. Recently, a new modulation technique known as orthogonal time frequency space (OTFS) has been introduced which provides robustness towards mobility induced Doppler spread. In OTFS, the channel impulse response in the delay-Doppler (DD) domain changes far slowly than its equivalent time domain impulse response. Due to this, the effective CI of OTFS based systems is large in comparison to that of OFDM based massive MIMO systems, reducing the need for frequent channel estimation. So the channel estimation overhead is less in OTFS based systems

relative to OFDM based systems.

In OTFS based systems, information symbols are embedded in the DD domain where they are jointly modulated to generate the time-domain transmit signal. Since multi-path delay and Doppler shift can spread information in the DD domain, information symbols need to be jointly demodulated. We can achieve high spectral and energy efficiency in OFDM based massive MIMO system with low complexity multiuser precoding in the downlink. But it is very challenging in case of the downlink of an OTFS based massive MIMO systems due to the requirement for joint demodulation of all information symbols at the UT irrespective of the amount of delay and Doppler spread. *To resolve this problem, we have proposed a novel OTFS based multi-user massive MIMO precoder at the BS and a corresponding low complexity detector (LCD) at the UT.* The sum spectral efficiency achieved by the proposed low complexity LCD is very close to that achieved by optimal joint demodulation at each UT. Numerical simulation results verify our analytical results and also show that proposed OTFS based massive MIMO precoder along with LCD detector achieves significantly better spectral efficiency and low frame/codeword error rate (FER) compared to OFDM based massive MIMO systems, with a much smaller channel estimation overhead.

In this dissertation, we have addressed the problems of overhead/latency due to ACK/NACK signaling and the channel estimation overhead of multi-user massive MIMO systems in high mobility scenarios. We have proposed novel methods to overcome these problems, to realize the vision of 5G.

सार

पांचवीं पीढ़ी (5जी) वायरलेस संचार प्रणालियों का केंद्रीय विचार एक तार रहित दुनिया बनाना है जो पिछली पीढ़ियों की सभी बाधाओं और सीमाओं से मुक्त हो। न केवल उद्योग बल्कि लगभग सभी देशों की सरकारें भी 5जी के लिए भारी दिलचस्पी दिखा रही हैं, जो 4जी में मोबाइल ब्राडबैंड की साधारण वृद्धि मात्र नहीं है। 5जी संचार प्रणाली से नए संचार परिदृश्यों जैसे अल्ट्रा विश्वसनीय कम विलंबता संचार (यूआरएलएलसी) सिस्टम, नए अनुप्रयोगों जैसे ऑटो मैटिक ड्राइविंग, रिमोट सर्जरी इत्यादि के लिए सेवा की गुणवत्ता (क्यूओएस) की आवश्यकता को पूरा करने की उम्मीद है। 5जी संचार प्रणाली में कई आशाजनक तकनीक शामिल हैं जैसे कि दृश्य प्रकाश संचार (वीएलसी), विशाल बहु-इनपुट बहु-आउटपुट (एमआईएमओ), मिलीमीटर-लहर संचार, और विषम नेटवर्क (HetNet) आदि। विशाल एमआईएमओ लगातार बढ़ रही ट्रैफिक डिमांड को पूरा करने के लिए सबसे आशाजनक तकनीकों में से एक है।

5जी संचार प्रणाली में उच्च वर्णक्रमीय दक्षता और कम विलंबता प्रमुख विशेषताएं है। 5जी के ये दोनों पहलू संचार प्रणालियों के ओवरहेड्स से अत्यधिक प्रभावित होते है। ये ओवरहेड्स उपलब्ध समय और आवृत्ति संसाधन की कीमत पर, सिस्टम के प्रदर्शन में सुधार करके अंतिम उपयोगकर्ता की उच्च गुणवत्ता (क्यूओएस) आवश्यकताओं को पूरा करने में मदद करते है। इसमें नेटवर्क द्वारा मोबाइल यूनिट का प्रमाणीकरण, चैनल माप के लिए प्रशिक्षण डेटा, यातायात चैनलों का आवंटन, सही डेटा रिसेप्शन की अभिस्वीकृति, चक्रीय उपसर्ग आदि शामिल है। नियंत्रण संकेत, चैनल अनुमान और चक्रीय उपसर्ग कुछ सामान्य ट्रांसमिशन ओवरहेड्स है जो की 4जी/5जी वायरलेस संचार सिस्टम में होते है। इस थीसिस में हमने, विशाल एमआईएमओ सिस्टम के लिए नई ट्रांसमिशन विधियों को प्रस्तावित किया है, जिसमें अभिस्वीकृति (एसीके)/ नकारात्मक अभिस्वीकृति (एनएसीके) नियंत्रण सिग्नलिंग और चैनल अनुमान ओवरहेड वर्तमान संचार प्रणाली की तुलना में काफी कम है।

सबसे पहले, हम एसीके/एनएसीके नियंत्रण सिग्नलिंग ओवरहेड पर विचार करते है। 4जी एलटीई में, हाइब्रिड ऑटोमैटिक रिपीट रिक्वेस्ट (एचएआरक्यू) आधारित ट्रांसमिशन मेथड का उपयोग किया जाता है जो सूचना को फिर से प्रसारित करता है जब तक यह सही ढंग से डीकोड न हो जाए। स्टॉप-एंड-वेट टाइप एचएआरक्यू में, बहुत अधिक देरी और ओवरहेड्स होता है क्योंकि प्रत्येक रीट्रान्समिशन के लिए ट्रांसमीटर को रिसीवर के कोडवर्ड को डीकोड करने और अभिस्वीकृति (एसीके/ एनएसीके) का संकेत देने के लिए प्रतीक्षा करने की आवश्यकता होती है । एसीके/एनएसीके संकेत समग्र सिस्टम ओवरहेड को बढ़ाता है। *हमने ओवरहेड को कम करने के लिए, विशाल एमआईएमओ सिस्टम के लिए एक अपलिंक ट्रांसमिशन विधि प्रस्तावित की जिसे "लो कंट्रोल सिग्नलिंग और सीएसआई फीडबैक " (एलएसएफ) विधि कहा जाता है।* प्रस्तावित विधि इस तथ्य पर आधारित है की विशाल एमआईएमओ सिस्टम में चैनल सख्त होने के कारण चैनल की क्षमता समय के साथ धीरे-धीरे बदलती है हम इस तथ्य का उपयोग, केवल एक बार कोडवर्ड की

उचित लंबाई तय करने के लिए करते है जो की अपलिंक चैनल क्षमता के प्रारंभिक अनुमान पर आधारित हैं जो बेस स्टेशन (बीएस) द्वारा वापस फीड किया गया है। उपयोगकर्ता टर्मिनल (यूटी) सूचना को उपयुक्त लंबाई के कोडवर्ड में एन्कोड करता है और फिर इसे बीएस के अभिस्वीकृति (एसीके/ एनएसीके) की प्रतीक्षा किए बिना लगातार कोहीरन्स अंतराल (सीआई) मे प्रसारित करता है। बीएस द्वारा डीकोडिंग पूरा कोडवर्ड प्राप्त हो जाने के बाद किया जाता है। डिकोडिंग के बाद, बीएस केवल एक एसीके/ एनएसीके यूटी को भेजता है । इसलिए, प्रस्तावित एलएसएफ विधि में एलटीई अपलिंक में प्रयुक्त एचएआरक्यू विधियों की तुलना में कम विलंबता और सिग्नलिंग ओवरहेड होता है।

अगला, हम चैनल अनुमान के कारण होने वाले ओवरहेड पर विचार करते है, विशेष रूप से समय-परिवर्तनीय और आवृत्ति चयनात्मक चैनल के लिए। कोहेरेंट डिटेक्शन, बीमफॉर्मिंग, संसाधन आवंटन आदि के लिए सटीक चैनल अनुमान आवश्यक है। पायलट-आधारित चैनल अनुमान में, ज्ञात पायलट प्रतीक संचारित किया जाता है, और रिसीवर चैनल का अनुमान लगाने के लिए प्राप्त पायलटों का उपयोग करता है। उच्च गतिशीलता (500 किमी/घंटा तक) 5जी संचार प्रणालियों की प्रमुख विशेषताओं में से एक है। उच्च गतिशीलता परिदृश्य में, उच्च डॉपलर प्रसार के कारण, चैनल सीआई छोटा होता है। छोटा सीआई, कम डेटा दर और उच्च चैनल अनुमान ओवरहेड की ओर ले जाता है। गतिशीलता प्रेरित डॉप्लर प्रसार में वृद्धि के साथ ऑर्थोगोनल फ्रीक्वेंसी डिवीजन मल्टीप्लेक्सिंग (ओएफडीएम) आधारित बहु-उपयोगकर्ता विशाल एमआईएमओ सिस्टम के प्रदर्शन में गंभीर रूप से गिरावट आती है । हाल ही में, एक नए मॉड्यूलेशन तकनीक को पेश किया गया है जिसे ऑर्थोगोनल टाइम फ्रीक्वेंसी स्पेस (ओटीएफएस) के रूप में जाना जाता है जो गतिशीलता प्रेरित डॉप्लर स्प्रेड के प्रति मजबूती प्रदान करता है। ओटीएफएस में, चैनल आवेग प्रतिक्रिया विलंब-डॉपलर (डीडी) डोमेन में होती है जो अपने समकक्ष समय डोमेन आवेग प्रतिक्रिया की तुलना में बहुत धीमी गति से बदलती है। इसके कारण, ओटीएफएस आधारित प्रणालियों का प्रभावी सीआई ओएफडीएम आधारित विशाल एमआईएमओ सिस्टम की तुलना में बड़ा होता है, जो की बार-बार चैनल अनुमान की आवश्यकता को कम करता है। इसलिए ओएफडीएम आधारित सिस्टम के सापेक्ष ओटीएफएस आधारित सिस्टम में चैनल अनुमान ओवरहेड कम होता है।

ओटीएफएस आधारित प्रणालियों में, सूचना प्रतीकों को डीडी डोमेन में एम्बेडेड किया जाता है जहां वे टाइम-डोमेन ट्रांसमिट सिग्नल उत्पन्न करने के लिए संयुक्त रूप से मॉडुलेट किये जाते है। चूंकि बहु-पथ विलंब और डॉपलर शिफ्ट डीडी डोमेन में सूचना फैला सकते हैं, इसलिए सूचना प्रतीकों को संयुक्त रूप से डिमॉड्यूलेट करने की आवश्यकता होती है। हम डाउनलिंक में ओएफडीएम आधारित विशाल एमआईएमओ प्रणाली में कम जटिलता बहुउपयोगकर्ता प्रीकोडिंग के साथ उच्च वर्णक्रमीय और ऊर्जा दक्षता प्राप्त कर सकते हैं। लेकिन यह है एक ओटीएफएस आधारित विशाल एमआईएमओ सिस्टम के डाउनलिंक के मामले में बहुत चुनौतीपूर्ण है क्योंकि यूटी पर सभी सूचना प्रतीकों के संयुक्त डिमॉड्यूलेशन की आवश्यकता है, चाहे देरी की मात्रा और डॉपलर फैलाव कुछ भी हो । *इस समस्या के समाधान के लिए हमने बीएस पर ओटीएफएस आधारित बहु-उपयोगकर्ता विशाल एमआईएमओ प्रीकोडर और इसके अनुरूप यूटी*

पर कम जटिलता डिटेक्टर (एलसीडी) प्रस्तावित किया है। प्रस्तावित कम जटिलता एलसीडी द्वारा प्रत्येक यूटी पर हासिल की गई वर्णक्रमीय दक्षता का योग इष्टतम संयुक्त डिमॉड्यूलेशन द्वारा प्राप्त योग के बहुत करीब है। संख्यात्मक सिमुलेशन परिणाम हमारे विश्लेषणात्मक परिणामों को सत्यापित करते हैं और यह भी दिखाते हैं कि ओएफडीएम आधारित विशाल एमआईएमओ की तुलना में प्रस्तावित ओटीएफएस एलसीडी डिटेक्टर के साथ आधारित विशाल एमआईएमओ प्रीकोडर बहुत छोटे चैनल अनुमान ओवरहेड के साथ काफी बेहतर स्पेक्ट्रल दक्षता और कम फ्रेम/कोडवर्ड एरर रेट (एफईआर) प्राप्त करता है।

इस शोध प्रबंध में हमने एसीके/एनएसीके सिग्नलिंग और उच्च गतिशीलता परिदृश्य मे बहु-उपयोगकर्ता विशाल एमआईएमओ सिस्टम चैनल मे अनुमान ओवरहेड के कारण ओवरहेड/विलंबता की समस्याओं को संबोधित किया है। हमने इन समस्याओं को दूर करने के लिए नए तरीकों को प्रस्तावित की किया है, ताकि 5जी विज़न को साकार किया जा सके।

Table of Contents

Certificate **i**

Acknowledgements **ii**

Abstract **iii**

List of Figures **ix**

List of Tables **xii**

List of Abbreviations **xiii**

1 Introduction **1**

1.1 Massive MIMO 2

1.2 Overhead 4

1.3 Motivations 8

1.3.1 Low Latency Scenario 8

1.3.2 High Mobility Scenario 9

1.4 Literature Review 10

1.5 Research Objectives 13

1.6 Overview of the Thesis 14

2 A Low Latency Transmission Method for Massive MIMO Systems with Low Control Signaling Overhead 16

2.1 System Model 18

2.2 Achievable Information Rate in the q^{th} Coherence Interval (CI) 19

2.3 Chase Combining (CC) and Incremental Redundancy (IR) 20

2.4 Proposed Transmission Method 21

2.5 Performance Analysis 24

2.6 Numerical Simulations 38

2.7 Conclusion 42

2.8 Future Work 43

3 A Transmission Technique for Multi-User Massive MIMO System with Low Channel Estimation Overhead in High Mobility Scenario 44

3.1 System Model 47

3.2 OTFS Modulation and Demodulation 50

3.2.1 OTFS Modulation 50

3.2.2 OTFS Demodulation 51

3.3 Proposed Multi-user Downlink Precoding in DD Domain 53

3.4 Low Complexity Detection of Received Multi-user OTFS Signal 57

3.5 Numerical Simulations 62

3.5.1 Coded Error Rate Performance Comparison between OTFS and OFDM Massive MIMO Systems with Imperfect CSI 67

3.6 Conclusion 71

3.7 Future Work 73

Bibliography **73**

Appendices **80**

A Proofs for Chapter 2 **81**

A.1 Proof of Slutsky's Theorems 81

A.2 Proof of Theorem 2.1 82

A.3 Proof of Theorem 2.2 83

A.4 Proof of Corollary 2.1 85

A.5 Proof of Theorem 2.3 86

B Proofs for Chapter 3 **90**

B.1 Derivation of (3.14) and (3.15) 90

B.2 Expression for $\gamma_{s,s',r,p}/Q \quad (s \neq s')$ 93

B.3 Expression for $\gamma_{s,s,r,r}/Q$ 94

B.4 Expression for $\gamma_{s,s,r,p}/Q \quad (r \neq p)$ 95

B.5 Proof of Theorem 3.2 96

B.6 OTFS Channel Estimation 98

List of Publications **105**

Technical Biography of Author **106**

List of Figures

1.1 Evolution of cellular communication. 2

1.2 Requirements of 5G [6]. 3

1.3 Uplink and downlink of multiuser (MU) massive MIMO systems [9]. 4

1.4 Doppler induced ICI in OFDM systems. 5

1.5 OFDM symbol with cyclic prefix. 7

1.6 Stop-and-Wait IR-HARQ transmission method. 8

1.7 Doppler induced ICI in OFDM system. 9

2.1 An example of the proposed transmission method. $T = 200, \tau = 50$, $R_d = 6$ bps/Hz, $C = 1.7$ bps/Hz. Latency incurred is 5 coherence intervals (CIs). . . 23

2.2 $EbNo(\kappa, R_d, Q^{max})$ and $J(\kappa, R_d, Q^{max})$ versus κ for $R_d = 1, 3$ bps/Hz and $Q^{max} = 3$. 33

2.3 $EbNo^{\star}(R_d, Q^{max})$ versus R_d. 34

2.4 $\kappa^{\star}(R_d, Q^{max})$ versus R_d for different values of Q^{max}. 35

2.5 Average Latency of the proposed LSF method and that of IR-HARQ versus number of BS antennas M, for a fixed outage probability of 1×10^{-3}. $T = 200$. Desired rate R_d is uniformly distributed in $\{\frac{r}{4} \,|\, 1 \leq r \leq 16\,,\, r \in \mathbb{Z}\}$ bps/Hz. For a given R_d, Q^{max} is chosen based on (2.45). 39

2.6 Plot of the required $\sqrt{MT}E_b/N_o$ versus the number of BS antennas M for a fixed desired outage probability of 1×10^{-3}. $T = 200$. Desired rate R_d is uniformly distributed in $\{\frac{r}{4} \,|\, 1 \leq r \leq 16\,,\, r \in \mathbb{Z}\}$ bps/Hz. For a given R_d, Q^{max} is chosen based on (2.45). 40

3.1 Time-Frequency and Delay-Doppler grids. 45

3.2 A multi-user massive MIMO downlink system. 49

3.3 Block diagram of the BS downlink transmitter with the proposed OTFS Multi-user Massive MIMO Precoder. 55

3.4 Block diagram of the receiver at the s-th UT with the proposed Low Complexity Detector (LCD). 59

3.5 Sum SE (bits/s/Hz) versus number of BS antennas Q (constant $\rho Q = 0.1$). . . 63

3.6 Sum SE (bits/s/Hz) versus maximum Doppler shift ν_{max} (Hz). 64

3.7 Per UT SE (bits/s/Hz) versus number of UTs K. 65

3.8 Sum SE (bits/s/Hz) vs. delay scaling factor r_τ. 66

3.9 OTFS Uplink (UL) and Downlink (DL) communication. 67

3.10 OFDM UL and DL frames with one codeword transmitted in one DL frame. . 68

3.11 OFDM UL and DL frames with one codeword spanning four DL frames. . . . 69

3.12 Frame Error Rate vs. ρ for OTFS and OFDM massive MIMO. 70

3.13 FER vs. ρ for OTFS massive MIMO. 71

A.1 $f(x)$ versus x. 88

B.1 Placement of uplink pilots in the DD domain. Pilots are transmitted by the UTs on the shaded DDREs. 98

List of Tables

2.1 Main Steps of the Proposed LSF Transmission Method 22

2.2 NACK Probability of IR-HARQ with $M = 20$ BS antennas and $Q^{max} = 3$. . 37

3.1 System Parameters 62

3.2 Sum Spectral Efficiency (bits/s/Hz) vs. $(\nu_{max}, \rho Q)$, $Q_h = Q_v = 14$, $K = 4$ UTs. 65

List of Abbreviations

ABER	Average bit error rate
ACMI	Accumulated Mutual Information
APM	Amplitude phase modulation
AN	Artificial noise
ASER	Average symbol error rate
AWGN	Additive white Gaussian noise
BS	Base Station
CC	Chase Combining
CFI	Control Format Indicator
CI	Coherence Interval
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Index
CSI	Channel State Information
DCI	Downlink Control Indicator
DD	Delay-Doppler
DDRE	Delay-Doppler Resource Element
eMBB	Enhance Mobile Broadband
FDD	Frequency Division Duplexing
FWA	Fixed Wireless Access
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HetNet	Heterogeneous Network
ICI	Inter-Carrier Interference
IMT	International Mobile Telecommunications
IR	Incremental Redundancy
ISFFT	Inverse Symplectic Finite Fourier Transform

ISI	Inter-Symbol Interference
LCD	Low Complexity Detector
LS	Least Square
LSF	Low Control Signaling and CSI Feedback
LTE	Long-Term Evolution
MC	Multi Cell
ML	Maximum Likelihood
MIMO	Multi Input Multi Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
mMTC	massive Machine Type Communications
MU	Multi User
OFDM	Orthogonal Frequency Divison Multiplexing
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
QOS	Quality of Services
RMa-NLOS	Rural Macro Non Line-of-Sight
RX	Receiver
SC	Single Cell
SE	Spectral Efficiency
SFFT	Symplectic Finite Fourier Transform
SIC	Successive Interference cancellation
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SU	Single User
TDD	Time Division Duplexing
TFRE	Time-Frequency Resource Element
TX	Transmitter
UCI	Uplink Control Indicator
URA	Uniform Rectangular Array

URLLC Ultra reliable Low Latency Communication

UT User Terminal

VLC visible light communication